

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroniky**

Modelování a simulace brzdných stavů DC pohonu s využitím  
speciálních bloků knihovny Matlab-Simulink

Modelling and Simulation of DC Drive Braking States with  
the Use of Special Blocks in Matlab-Simulink Library

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroniky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Radim Karafiát**

Studijní program: B2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika

Téma: Modelování a simulace brzdných stavů DC pohonu s využitím speciálních bloků knihovny Matlab-Simulink  
Modelling and Simulation of DC Drive Braking States with the Use of Special Blocks in Matlab-Simulink Library

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor – matematický model DC pohonu pro motorický a brzdný režim
2. Sestavení simulačního modelu DC pohonu pro motorický a brzdný režim
3. Simulační ověření vlastností DC pohonu pro motorický a brzdný režim

Seznam doporučené odborné literatury:


Dle pokynů vedoucího závěrečné práce

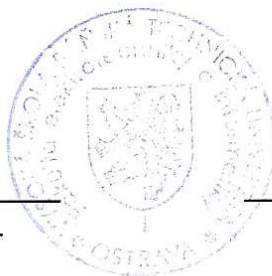
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

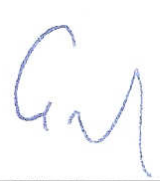
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ivo Neborák, CSc.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.  
vedoucí katedry

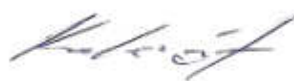


  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

*7.května 2013*



.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych velice rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ivu Neborákovi, CSc. za odborné konzultace a rady, které mi pomohly při vypracování této bakalářské práce.

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá stejnosměrnými motory, jejich vlastnostmi a modelováním brzdných stavů. Práce obsahuje teoretickou část, která popisuje činnost DC motoru. Další převážná část je věnována modelování v programu Matlab-Simulink. Pro základní pochopení DC motoru byl vytvořen matematický model pomocí standardních bloků, ze kterého následně vycházelo modelování brzdných stavů. Následně byly vytvořeny modely pomocí speciálních bloků z knihovny SimPowerSystems programu Matlab-Simulink.

## **Klíčová slova**

Matlab – Simulink; DC motor; brzdné stavy; simulace

## **ABSTRACT**

This Bachelor's thesis deals with DC machines, their properties and modelling braking states. The work includes a theoretical part which describes an activity of DC machine. The next major part contains modelling in program Matlab – Simulink. For basic understanding of the DC machine, the mathematical model was created using standard blocks from which subsequent modelling of braking states came out. Then there were created models using special blocks from a library SimPowerSystems in Matlab – Simulink.

## **Keywords**

Matlab – Simulink; DC machine; Braking States; simulation

## Seznam použitých symbolů a zkratek:

symbol	název	jednotka
$R$	činný odpor	[ $\Omega$ ]
$L$	indukčnost	[H]
$i, I$	proud	[A]
$c$	konstanta buzení	[-]
$\phi$	magnetický indukční tok	[Wb]
$\omega$	úhlová rychlost	[rad/s]
$u, U$	napětí	[V]
$J$	celkový moment setrvačnosti	[kg.m <sup>2</sup> ]
$B$	koeficient viskózního tření	[N.m.s/rad]
$M$	moment	[N.m]
$T$	časová konstanta	[s]

## Indexy

$a$	kotva stejnosměrného motoru
$e$	elektromagnetický
$i$	indukovaný
$c$	celkový
$f$	buzení

# OBSAH

<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REGULACE POHONŮ.....</b>	<b>1</b>
2.1 ÚVOD .....	1
2.2 DRUHY ELEKTRICKÝCH POHONŮ .....	2
2.3 PRACOVNÍ STAVY POHONU .....	3
<b>3. STEJNOSMĚRNÉ STROJE.....</b>	<b>3</b>
3.1 ZÁKLADNÍ ČÁSTI STEJNOSMĚRNÉHO STROJE .....	4
3.1.1 Stator .....	4
3.1.2 Rotor.....	4
3.1.3 Komutátor.....	4
3.2 ROZDĚLENÍ STEJNOSMĚRNÝCH STROJŮ .....	5
3.3 PRINCIP ČINNOSTI DC MOTORU .....	5
<b>4. MATEMATICKÝ MODEL DC MOTORU .....</b>	<b>6</b>
<b>5. MATLAB SIMULINK.....</b>	<b>9</b>
5.1 SIMULINK.....	9
5.2 ANALÝZA VYBRANÝCH BLOKŮ PRO TVORBU DC MODELU .....	10
5.2.1 Blok Integrátor .....	10
5.2.2 Blok Transfer Fcn.....	11
5.2.3 Blok Gain.....	13
5.2.4 Blok Step.....	14
<b>6. VYTVOŘENÍ MODELU PROSTŘEDNICTVÍM SIMULINKU .....</b>	<b>16</b>
6.1 MAT. MODEL DC MOTORU: .....	17
6.2 MAT. MODEL DC MOTORU PO ZATÍŽENÍ: .....	18
<b>7. BRZDNÉ STAVY DC MOTORU S MODELY V SIMULINKU .....</b>	<b>19</b>
7.1 GENERÁTORICKÉ BRZDĚNÍ .....	19
7.2 BRZDĚNÍ DO ODPORU .....	21
7.3 BRZDĚNÍ PROTIPROUDEM .....	23
<b>8. KNIHOVNA SIMULINKU DC MOTORU .....</b>	<b>28</b>
<b>9. SIMULACE DC MOTORU - SIMPOWERSYSTEMS.....</b>	<b>32</b>
9.1 DC MOTOR S PŘÍVEDENÍM MOMENTU .....	32
9.2 DC MOTOR S PŘÍVEDENÍM RYCHLOSTI.....	33
<b>10. ZÁVĚR.....</b>	<b>35</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>36</b>

# 1. Úvod

Obsahem mé bakalářské práce jsou DC motory včetně jejich modelování v programu Matlab – Simulink. V teoretické části stručně popisuji základní části stejnosměrného stroje jejich rozdělení a principy činnosti. Dále jsem se zaměřil na popis základních bloků, které jsem dále aplikoval do sestavení základního matematického modelu DC motoru. Ze základního matematického modelu jsem dále vycházel pro tvorbu modelů brzdných stavů stejnosměrného motoru. V dalších krocích se zabývám teoretickému popisu speciálního bloku v programu Matlab - Simulink stejnosměrného motoru (DC machine). Tento blok plně nahrazuje již zmiňovaný matematický model. V bloku si můžeme vybrat škálu přednastavených motorů, také si ovšem zvolit svůj vlastní a vněm nastavovat parametry námi požadovaného motoru.

## 2. Regulace pohonů

### 2.1 Úvod

Definice (dle ČSN 34 5170): Elektrický pohon je zařízení pro elektromechanickou přeměnu energie (včetně řízení této přeměny), které slouží k tomu, aby předepsaným způsobem uvedlo poháněný pracovní mechanismus nebo zpracovávanou látku do požadovaného pohybového stavu. [1]

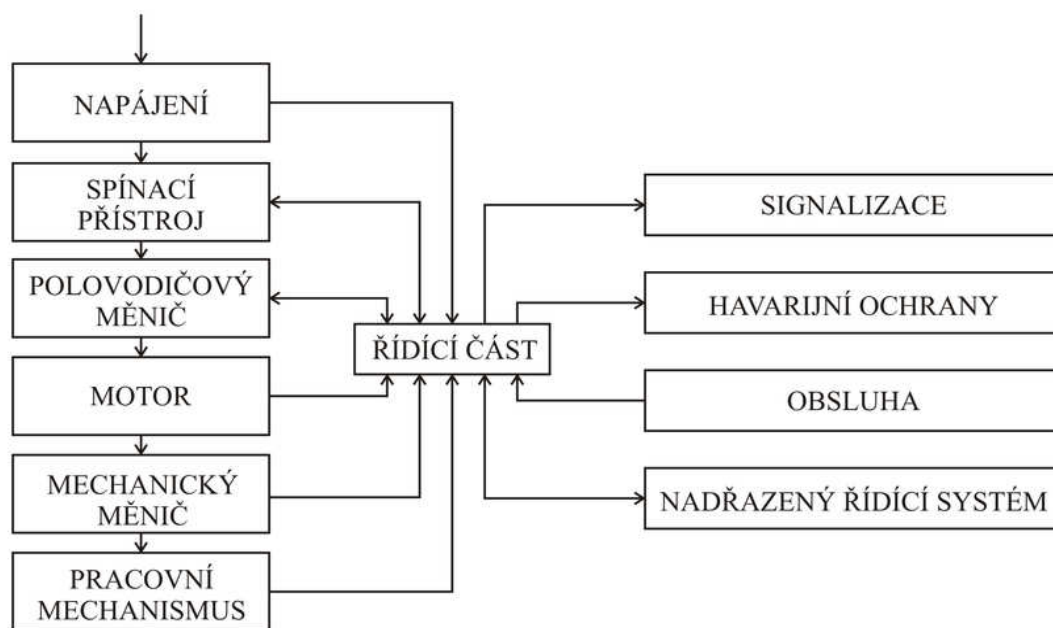
Výhody el. pohonu:

- okamžitá pohotovost nasazení
- dobrá řiditelnost mechanických veličin (moment, rychlost, poloha)
- dobrá účinnost
- malá hmotnost, malá náročnost na údržbu a snadná vyměnitelnost
- možnost použití i do složitých a nebezpečných prostředí
- snadná reverzovatelnost, možnost krátkodobého přetížení

Nevýhody el. pohonu:

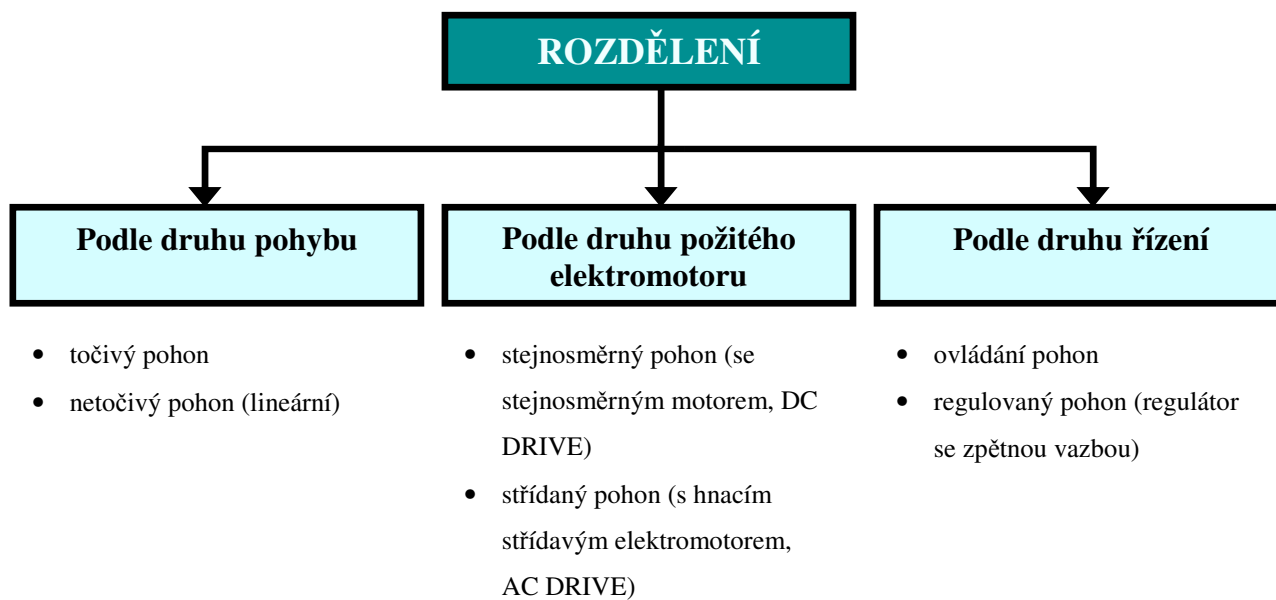
- závislost na přívodu el. energie
- vysoké jmenovité otáčky (vyžaduje použití mechanických převodů)





Obr 1. Blokové schéma elektrického pohonu

## 2.2 Druhy elektrických pohonů

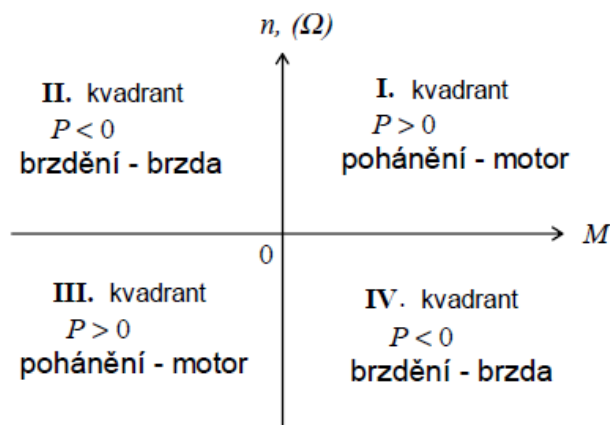


## 2.3 Pracovní stavy pohonu

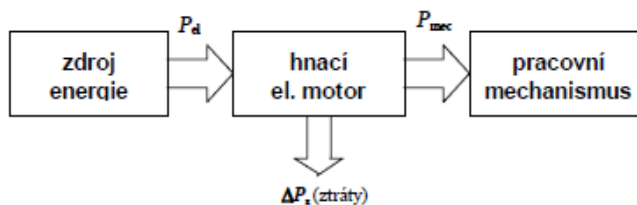
**Pohánění** (tok mechanické energie je od motoru k prac. mechanismu)

**Brždění** (tok mechanické energie je od prac. mechanismu k motoru)

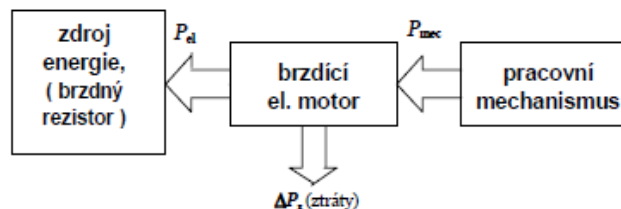
Pracovní stavy motoru je vhodné popisovat momentem  $M$  a otáčkami  $n$  (rychlostí otáčení  $\Omega$ ) včetně jejich grafického znázornění v rovině  $M$ - $n$  ( $M$ - $\Omega$ ) rozdělené osami momentu  $M$  a otáčkami  $n$  (rychlostí  $\Omega$ ) na 4 kvadranty I, II, III, IV (obr. 2).



Obr 2. Polohy pracovního bodu el. pohonu



Obr 3. Tok výkonů el. pohonu v prac. stavu pohánění



Obr 4. Tok výkonů el. pohonu v prac. stavu brzdění

## 3. Stejnosměrné stroje

Jsou historicky nejstaršími elektrickými stroji a zprvu se používali jako generátory pro výrobu stejnosměrného proudu. SS motor je ideálním regulačním motorem – otáčky jdou plynule měnit změnou přiváděného napětí. SS motor má tu zvláštnost, že se dá použít jako stejnosměrný generátor i jako motor (záleží na druhu dodávané energie). V současné době se ss stroje používají především jako motory v elektrických regulovaných pohonech (automobilový průmysl, v elektrické trakci). Řez motorem je na obr. 5 [2].

### 3.1 Základní části stejnosměrného stroje

SS stroj se skládá ze tří částí rotoru, statoru a komutátoru.

#### 3.1.1 Stator

Je vnější pevná nepohyblivá část motoru. Stator je tvořen z lamel s velkým otvorem ve středu, ve kterém se rotor může otočit. V statoru jsou drážky, ve kterém jsou vloženy vinutí pro cívkou.

#### 3.1.2 Rotor

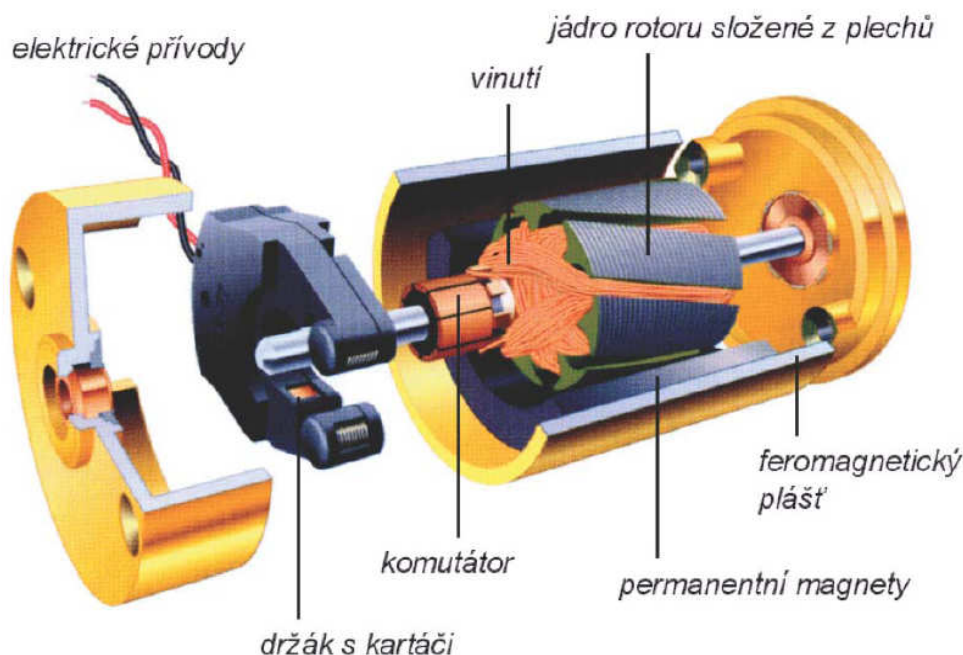
Je pohyblivá část motoru (nazývána také kotvou). Je tvořen cívkami, do kterých přivádíme elektrickou energii ta vytvoří rotorové magnetické pole, které pak vzájemným působením se statorovým vytvoří pohyb.

#### 3.1.3 Komutátor

Komutací nazýváme proces, kdy v komutující cívkě dochází ke změně polarity proudu. Komutátor zajišťuje přepínání směru proudu vedeného do rotorových cívek tak, aby byla napájena vždy cívka pod aktivním pólem a byla dosažena co největší účinnost stroje.

Je umístěn vždy na rotoru stroje, skládá se z řady vzájemně izolovaných vodivých lamel, na něž doléhají kartáče.

Komutátor jako poměrně složitá mechanická součást přenášející velké proudy bývá zdrojem nežádoucích mechanických poruch či elektromagnetického rušení, jež vzniká vlivem nežádoucího jiskření. To nastává především vlivem vzniku vzduchových mezírek mezi sběračem proudu a povrchem komutátoru. Vzhledem k tomuto jiskření mezi kartáči a komutátorem nejsou stroje vybavené komutátory vhodné do prostředí s možností výskytu hořlavých či výbušných plynů.



Obr 5. Hl. části ss motoru [3]

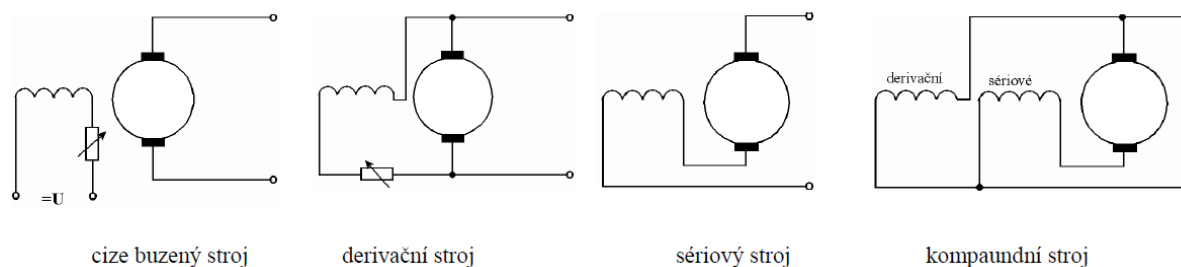
### 3.2 Rozdělení stejnosměrných strojů

**S cizím buzením** – budící vinutí hlavních pólů je napájené z nezávislého jednosměrného zdroje, nebo má stroj permanentní magnety.

**S derivačním buzením** – budící vinutí hlavních pólů je zapojené paralelně ke kotvě.

**Se sériovým buzením** – budící vinutí hlavních pólů je zapojeno do série s kotvou.

**S kompaundním (sdružené) buzením** – na hlavních pólech je budící vinutí derivační a sériové.



Obr. 6. Druhy stejnosměrných strojů

### 3.3 Princip činnosti DC motoru

Stator DC motoru je po obvodě opatřen pravidelně prostřídánými a navzájem magneticky opačně orientovanými vyniklými hlavními póly (cívky jejich vinutí budí magnetické pole motoru) a vyniklými pomocnými, komutačními póly (napomáhají komutaci rotorového vinutí). Za hlavním pólem následuje vždy pomocný pól téže polarity. Rotor má v drážkách rozložené vinutí s cívkami, vyvedenými k mechanickému komutátoru, který zajišťuje přivádění správně orientovaného proudu do cívek rotoru.

Reakční magnetické pole vytváří proud, který teče vinutím kotvy. Reakční mag. pole zeslabuje a deformuje mag. pole hlavních pólů a ovlivňuje mag. pole komutačních pólů. K potlačení reakčního pole slouží kompenzační vinutí, které je založené do drážek pólových nadstavců hl. pólů.

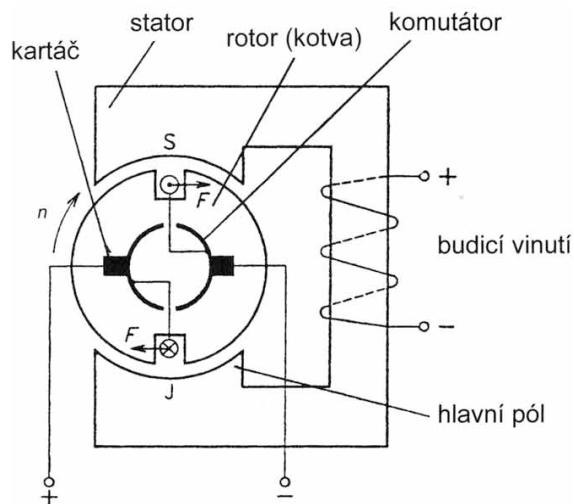
U moderních strojů, je stator i rotor složen z izolovaných dynamoplechů, pokud se ovšem vyžadují kvalitní dynamické vlastnosti, může být stator z masivní měkké oceli. [4]

#### Výhody

- snadné řízení - změnou budícího napětí na rotoru
- lineární charakteristika závislosti otáček na budícím napětí na rotoru

#### Nevýhody

- komutátor - nutná údržba kluzných kontaktů (uhlíkových kartáčů). Vzniká zde také jiskření, které v kombinaci s průmyslovým prachem může zapříčinit výbuch
- konstrukčně náročné, rozměrné

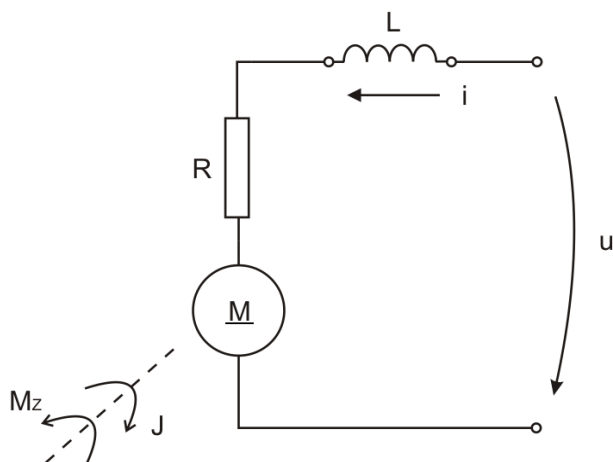


Obr. 7. Principiální schéma činnosti DC motoru

## 4. Matematický model DC motoru

Pomocí soustavy diferenciálních rovnic, je popsán matematický model. Výhodou těchto matematických modelů je to, že pokud chceme zkoumat chování soustavy, jednoduše ji nasimulujeme v programu Matlab&Simulink. V programu můžeme libovolnou změnou kteréhokoliv parametru zjišťovat chování výstupu. Další výhodou je možnost testování soustavy na všechny mezní stavy bez poškození reálného stroje. Výsledky však nejsou nikdy 100%, jelikož při simulacích nezohledňujeme některé méně významné faktory. Čím víc je model reálnější, tím se více podobá skutečnosti. Modelování patří k běžným postupům v navrhování soustav a součástek. Tímto firmy ušetří mnoho peněz.

Máme stejnosměrný motor buzený permanentními magnety:



Obr.8. Elektrické, zjednodušené schéma stejnosměrného motoru buzeného permanentními magnety

Rovnice představuje rovnováhu napětí kotvy

$$U = R_{ai} + L_a \frac{di}{dt} + c\phi\omega \quad (1)$$

kde:

$R_{ai}$  je napětí na odporu vinutí motoru

$L_a \frac{di}{dt}$  je napětí na indukčnosti motoru

$$c\phi\omega = u_i = K_e \omega$$

$c$  je konstanta buzení [-]

$\phi$  je magnetický indukční tok [Wb]

$\omega$  je úhlová rychlost působící na hřídeli motoru [rad/s]

$u_i$  je indukované napětí

$K_e$  je elektrická konstanta [rpm/v]

Rovnice (2) představuje rovnováhu momentů na hřídeli motoru

$$c\phi_i = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + M_o \quad (2)$$

kde:

$J$  je celkový moment setrvačnosti [kg.m<sup>2</sup>]

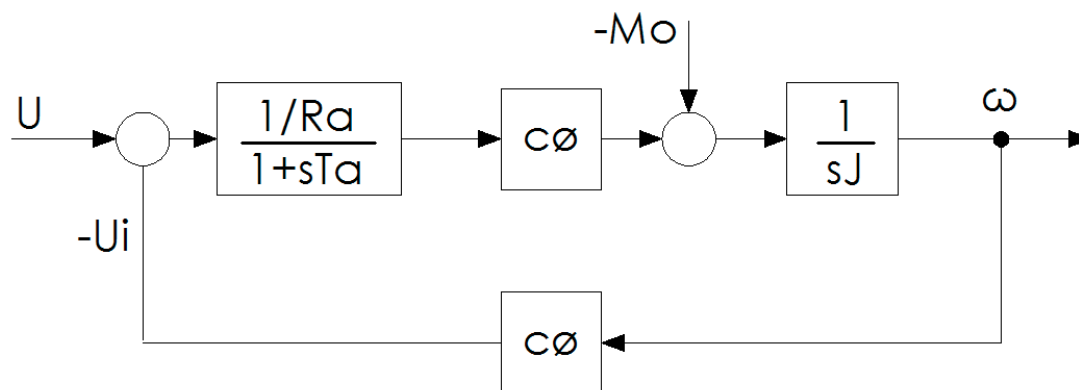
$B$  je koeficient viskosního tření [N.m.s/rad]

$M_o$  je moment odporu [N.m]

Obvod kotvy je popsán rovnicí (1).

Dif. Rovnice po Laplaceově transformaci má tvar:

$$U = R_a I(s) + sL_a I(s) + U_i(s) \quad (3)$$



Obr.9. Blokové schéma stejnosměrného motoru

Matematický model tvoří přenosové funkce  $F1(s)$ ;  $F2(s)$ ;  $F3(s)$ ;  $F4(s)$ , které si nyní popíšeme:

$F1(s)$  je poměr výstupu ke vstupu: výstupem je proud  $I(s)$ , vstupem je rozdíl mezi přiváděným napětím na kotvu a napětím indukovaného  $U-U_i$ . První část modelu je tedy:

$$F1(s) = \frac{I(s)}{U - U_i(s)} = \frac{1}{R_a + sL_a} = \frac{1/R_a}{1 + sT_a} \quad (4)$$

$F2(s)$  je proporcionální člen, vyjadřuje závislost momentu motoru na proudu kotvy  $M(s) = c\phi I(s)$ .

Druhá část je:

$$F2(s) = \frac{M(s)}{I(s)} = c\phi \quad (5)$$

$F3(s)$  je přenos členu s momentem setrvačnosti  $J$

$$F3(s) = \frac{\omega(s)}{M(s) - M_o} = \frac{1}{sJ} \quad (6)$$

$F4(s)$  je závislost mezi indukovaným napětím v kotvě a úhlovou rychlostí. Přenos tohoto členu je:

$$F4(s) = \frac{U_i(s)}{\omega(s)} = c\phi \quad (7)$$

Stejnoseměrný motor je popsán soustavou lineárních diferenciálních rovnic. Pro vytvoření modelu v programu MATLAB/SIMULINK musíme rovnice upravit tak, abychom na levé straně měli derivace požadovaných veličin. Po úpravě dostaneme:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (U - R_{ai} - c\phi\omega) \quad (8)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{c\phi}{J} i \quad (9)$$

## 5. MATLAB SIMULINK

Název MATLAB vznikl z anglického MATrix LABoratory. MATLAB byl napsán, aby poskytoval jednoduchý přístup k matematickým knihovnám vyvinutým v projektech LINPACK a EISPACK. Byl původně určen pro operační systém UNIX a tato okolnost se dodnes i v prostředí Windows projevuje ve velmi jednoduchém základním komunikačním rozhraní.

MATLAB je vysoce výkonný jazyk pro technické výpočty. Integruje výpočty, vizualizaci a programování do jednoduše použitelného prostředí, kde problémy i řešení jsou vyjádřeny v přirozeném tvaru.

Jako samotné rozšíření MATLABU existuje **SIMULINK** – časové řešení soustavy nelineárních diferenciálních rovnic s grafickým zadáváním řešené soustavy připomínajícím zapojení na analogovém počítači. Umožňuje graficky sledovat průběhy veličin v libovolném místě zapojení. Používá se např. pro simulaci dynamického chování sledovaného systému. [5]

### 5.1 SIMULINK

Simulink je především určen na časové řešení (simulací) chování dynamických systémů. Lze s jeho pomocí určit časové průběhy výstupních veličin (a všech ostatních) v závislosti na časovém průběhu veličin vstupních a počátečním stavu. Popis soustavy může být značně rozsáhlý a složitý. Může obsahovat i algebraické rovnice a vzorkované diskrétní výpočty.

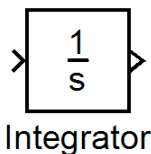
Vzhledem k třídě problémů, na řešení kterých je **SIMULINK** určený, se u uživatele předpokládají alespoň základní znalosti v oblasti matematického modelování a simulace.

Přístup k návrhu zápisu problému silně připomíná návrh zapojení pro analogový počítač. Co zaujme na první pohled, je grafický způsob zápisu – v terminologii **SIMULINK** nazývaný model. Z nabídky příslušné knihovny se přetahují výkonné bloky a pak se pospojují odpovídající vstupy a výstupy (signály). [5]



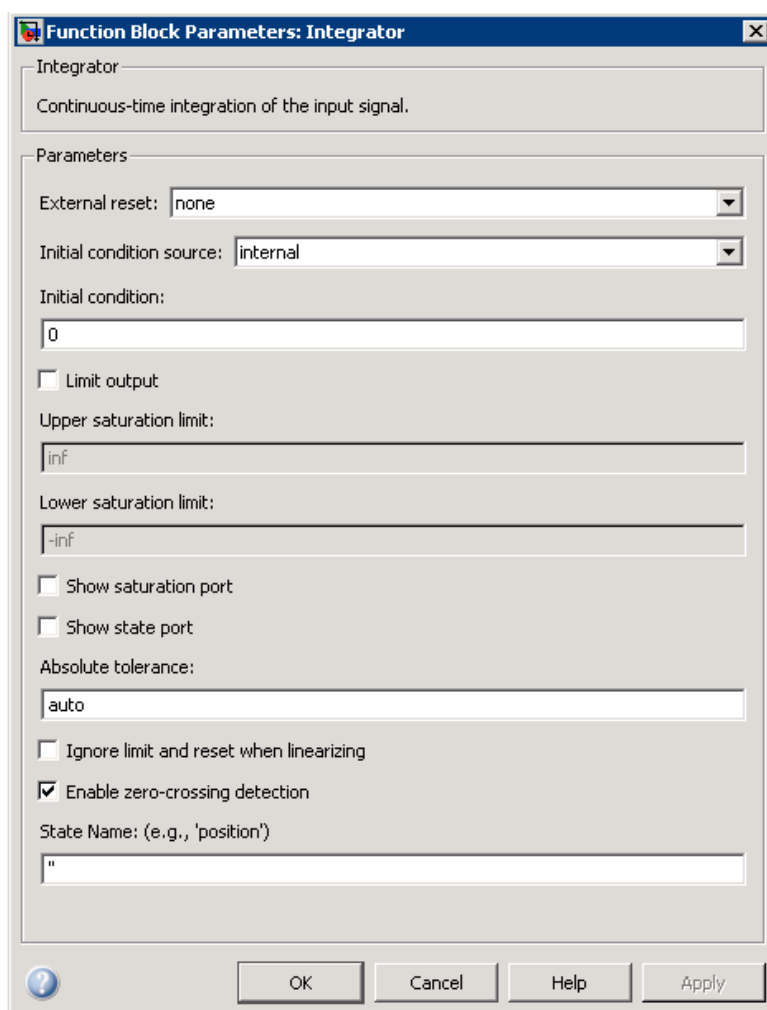
## 5.2 Analýza vybraných bloků pro tvorbu DC modelu

### 5.2.1 Blok Integrátor



Obr.10. Schématická značka bloku Integrator

Blok Integrator zadává počáteční podmínky a limitaci výstupu. Poč. podmínky i limitace výstupu lze zadat přímo hodnotou parametru nebo také pomocí dalších vstupních signálů. Blok dovoluje i nastavení do počátečního stavu na základě změny řídicího logického signálu. Další možností nastavení je definování stavového výstupu (state portu). Využívá se ve spojitosti s externím resetem integrátoru a určuje hodnotu výstupu, pokud by nedošlo k resetu.



Obr.11. Okno pro nastavení parametrů bloku Integrátor

Popis nabídky Parameters:

#### ***External reset***

Na základě spuštění impulsu obnovovacího signálu obnovuje stavy poč. podmínek

#### ***Initial condition source***

Získává počáteční podmínky stavů

#### ***Initial condition***

Specifikuje stavy počátečních podmínek

#### ***Limit output***

Je výstup na hodnoty mezi dolní a horní mezí saturace. Standardně je pole odkliknuto, což znamená nemožnost změn mezí saturace. Zaškrtnutím můžeme změnit tyto meze.

#### ***Show saturation port***

Přidává saturační výstupní port bloku. Standardně je pole odkliknuto, zaškrtnutím povolíme přidání výstupního portu.

#### ***Show state port***

Přidává výstupní port bloku pro blokové stavy. Standardně je pole odkliknuto, zaškrtnutím povolíme přidání výstupního portu pro blokové stavy.

#### ***Absolute tolerance***

Je absolutní tolerance pro výpočet výstupního bloku. Můžeme nastavit buď automatickou, nebo numerickou hodnotu.

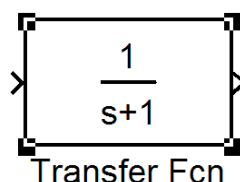
#### ***Ignore limit and reset when linearizing***

Je linearizace pomocí příkazu, které upravují blok, aby nebyly limity na výstupu resetovány a omezeny nastavením. Standardně je pole odkliknuto.

#### ***Enable zero – crossing detection***

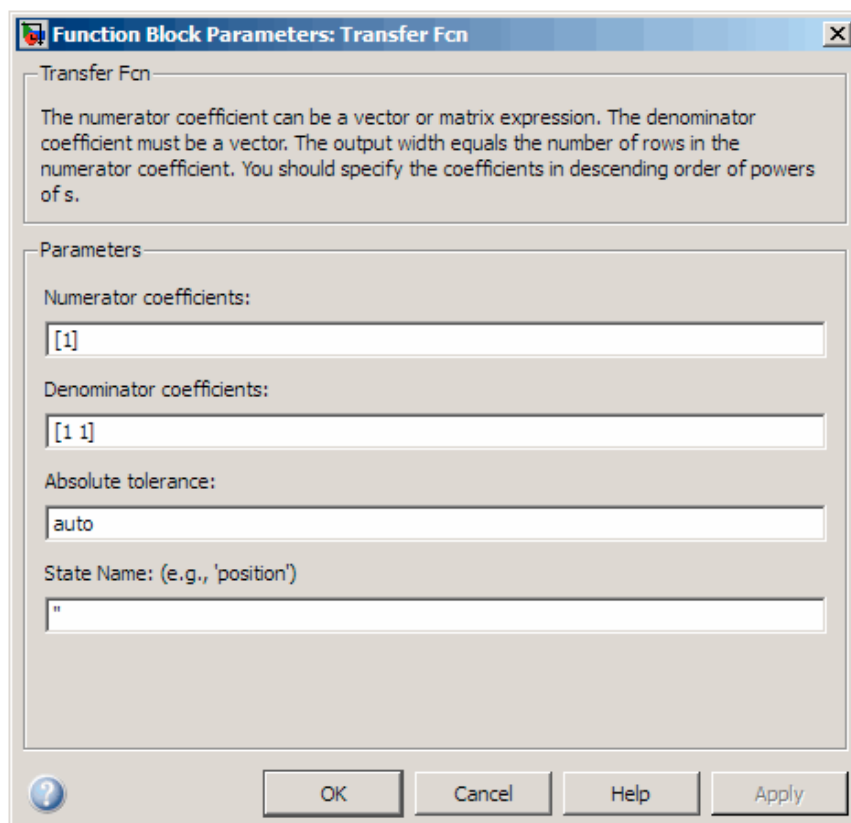
Standardně je pole zakliknuto, což znamená, že vezme časový krok pro události jako je reset nebo vstupní či výstupní horní nebo dolní saturační stav.

## **5.2.2 Blok Transfer Fcn**



*Obr.12. Schématická značka bloku Transfer Fcn*

Blok Transfer Fcn modeluje lineární systém Laplaceovou transformací s proměnnou  $s$ . Blok může modelovat systémy: SISO (jeden vstup a jeden výstup), SIMO (jeden vstup a více výstupů).



Obr.13. Okno pro nastavení parametrů bloku Transfer Fcn

Popis nabídky Parameters:

***Numerator coefficients (čítatel)***

Definujte vektor koeficientů čitatele.

***Denominator coefficients (jmenovatel)***

Definujte vektor koeficientů jmenovatele.

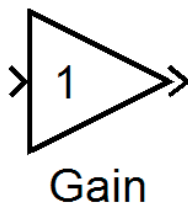
***Absolute tolerance***

Určuje absolutní toleranci pro výpočet výstupního bloku.

***State Name - Název stavu (např. pozice)***

Přiřazuje jedinečný název ke každému stavu.

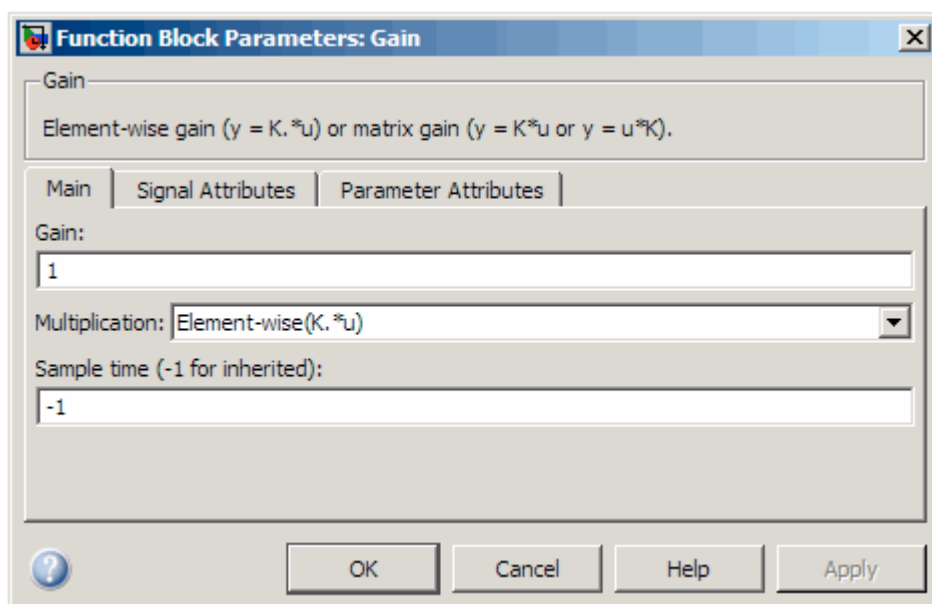
### 5.2.3 Blok Gain



Obr. 14. Schématická značka bloku Gain

Blok Gain násobí vstupy konstantní hodnotou. Vstup může být skalární, vektorový nebo maticový. Určuje hodnotu zesilovače v Gain parametru. Pro maticové násobení parametr také ukazuje pořadí činitelů.

Vstup a zesilovač se násobí a výsledek je převeden na výstup pomocí zaokrouhlování.



Obr.15. Okno pro nastavení parametrů bloku Gain

Popis nabídky Parameters:

#### Gain

Specifikuje hodnotu, kterou násobí vstup.

#### Multiplication

Specifikuje tyto režimy:

*Element-wise* ( $K.*u$ )

Každý prvek vstupu se násobí každým prvkem zesilovače. Je-li to nutné, blok provádí zvětšení tak, aby vstupní zesílení mělo stejné rozměry.

*Matrix* ( $K*u$ )

Vstup do zesilovače je maticově násoben vstupem jako druhý operand.

*Matrix ( $u \cdot K$ )*

Vstup do zesilovače je maticově násoben vstupem jako první operand.

*Matrix ( $K \cdot u$ )( $u$  vector)*

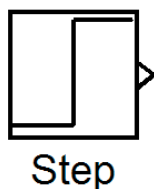
Vstupy do zesilovače jsou maticově násobeny vstupem jako druhý operand. Tento režim je totožný s Matrix ( $K \cdot u$ ).

Předpokládáme, že  $K$  je  $m \cdot n$  matice. Matrix ( $K \cdot u$ ) nastaví vstup na vektor délky  $n$  a výstup na vektor délky  $m$ . Naproti tomu Matrix ( $K \cdot u$ ) se používá k určení rozměrů pro vstup a výstup.

**Sample time (-1 for inherited)**

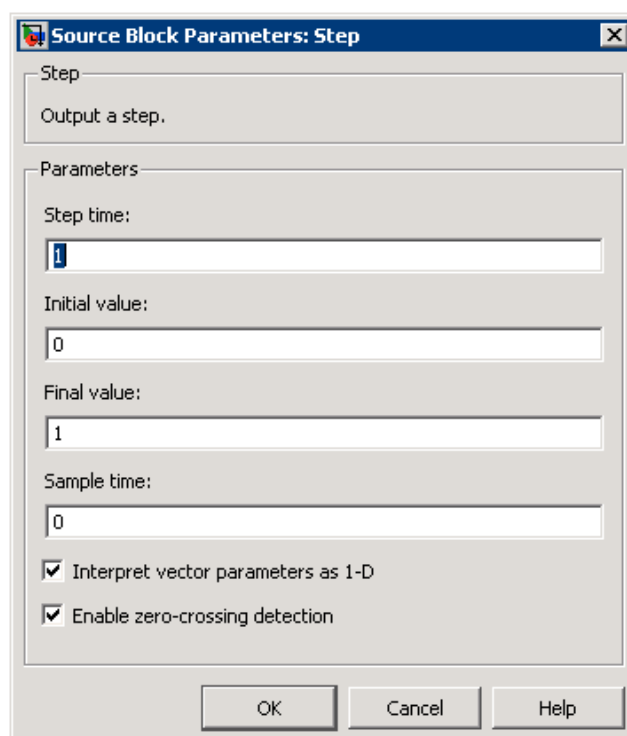
Specifikuje časový interval mezi vzorky.

## 5.2.4 Blok Step



Obr.16. Schématická značka bloku Step

Step (jednotkový skok) poskytuje krok mezi dvěma úrovněmi definovaných úrovní v určitém čase. Step je generátorem skokové funkce z hodnoty Initial value na hodnotu Final value v simulačním čase Step time.



Obr.17. Okno pro nastavení parametrů bloku Step

Popis nabídky Parameters:

***Step time***

Čas se udává v sekundách. V případě výstupu z parametru Initial value do parametru Final value, je výchozí hodnota 1 sekunda.

***Initial value***

Když simulační čas při výstupu bloku dosáhne parametru Step time, výchozí hodnota je 0.

***Final value***

Když simulační čas při výstupu bloku dosáhne a překročí Step time parametr, výchozí hodnota je 1.

***Sample time***

Vzorkovací hodnota kroku.

***Interpret vector parameters as 1-D***

Pokud je pole zakliknuto, řádek nebo sloupec maticových hodnot má číselné parametry, v důsledku na vystupující signál. Pokud pole zakliknuto není, blok má na výstupní signál stejných rozměrů jako blok číselných parametrů.

***Enable zero-crossing detection***

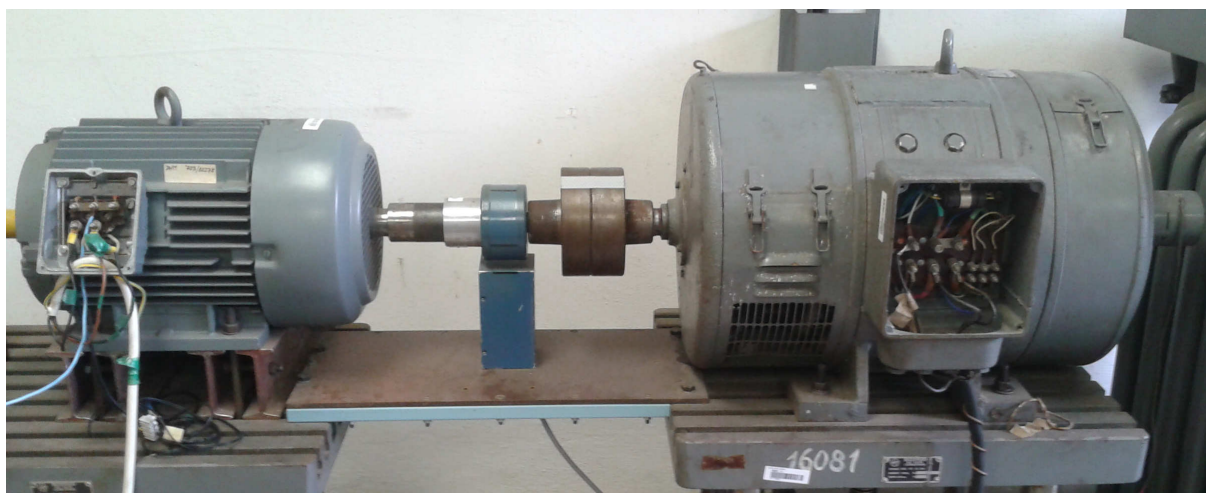
Výběrem této možnosti povolíme nulovou detekci.

## 6. Vytvoření modelu prostřednictvím SIMULINKU

### Typ motoru TTN 20 Ab

Parametry motoru:

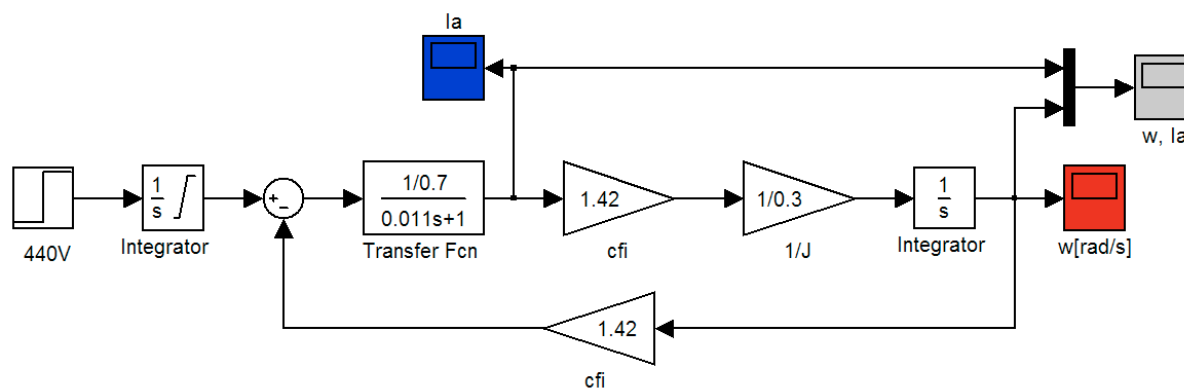
$P_n = 15 \text{ kW}$ ,  $U_{an} = 440 \text{ V}$ ,  $I_{an} = 37.5 \text{ A}$ ,  $n_n = 2800 \text{ ot/min}$ ,  $I_{bn} = 1 \text{ A}$ ,  $U_{bn} = 190 \text{ V}$ ,  
 $c\phi = 1.42 \text{ Vs}$ ,  $L_{ac} = 8 \text{ mH}$ ,  $R_{an} = 0.7 \Omega$ ,  $J_m = 0.3 \text{ kgm}^2$ ,  $R_b = 162 \Omega$ ,  $L_b = 35,5 \text{ H}$ .



*Obr.18. Motor TTN 20Ab*

Na obrázku je motor TTN 20Ab (vpravo), který je propojen hřídelí s asynchronním motorem (AM). Ve své bakalářské práci jsem volil na místo AM, motor stejnosměrný s totožnými parametry jako má motor TTN 20Ab.

## 6.1 Mat. model DC motoru:

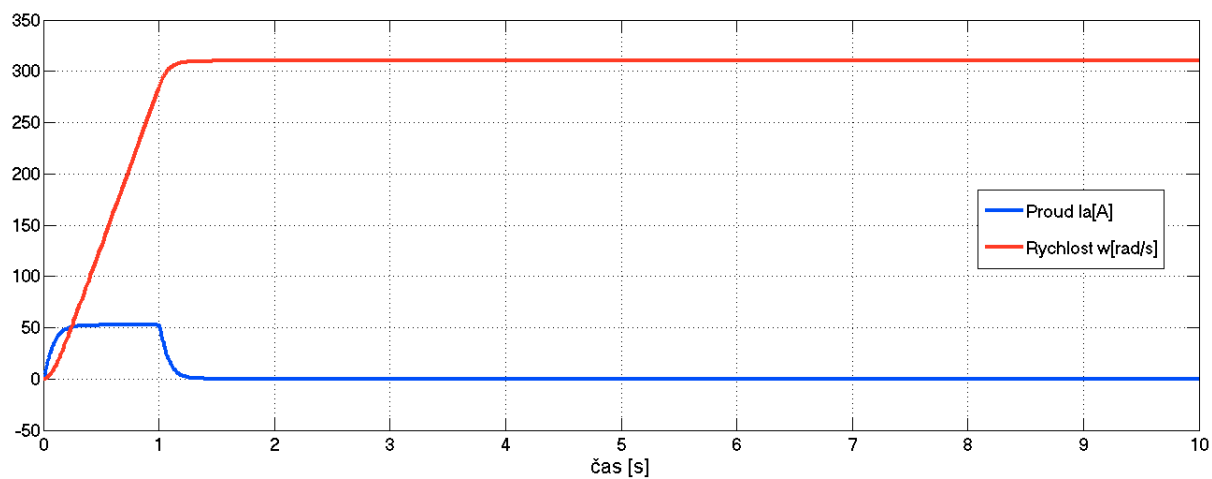
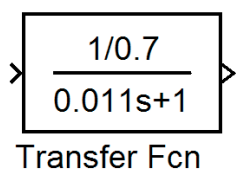


Obr.19. Model DC motoru v programu Matlab Simulink

$$T_{ac} = \frac{L_{ac}}{R_{ac}}$$

$$T_{ac} = \frac{0,008}{0,7}$$

$$T_{ac} = \underline{\underline{0,011}}$$



Obr.20. Graf proudu a otáček procházejícího modelem motoru

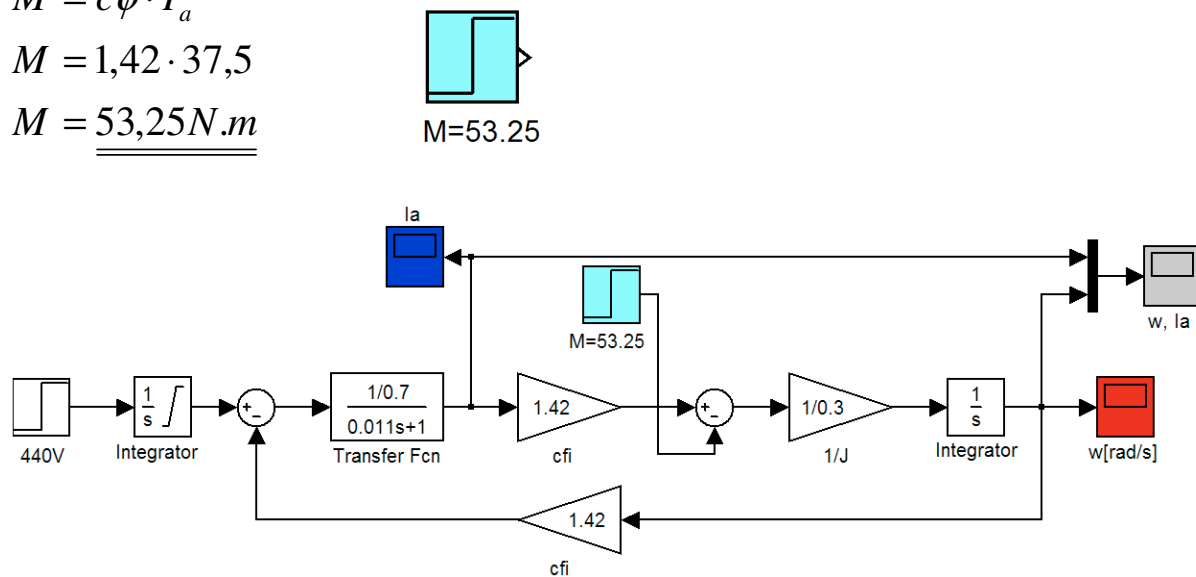


## 6.2 Mat. model DC motoru po zatížení:

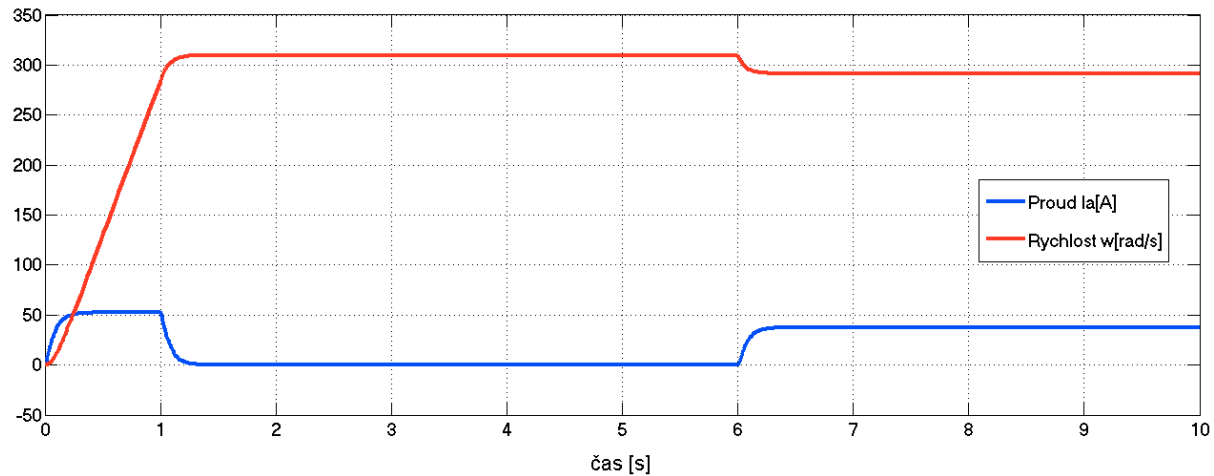
$$M = c\phi \cdot I_a$$

$$M = 1,42 \cdot 37,5$$

$$M = \underline{\underline{53,25 N.m}}$$



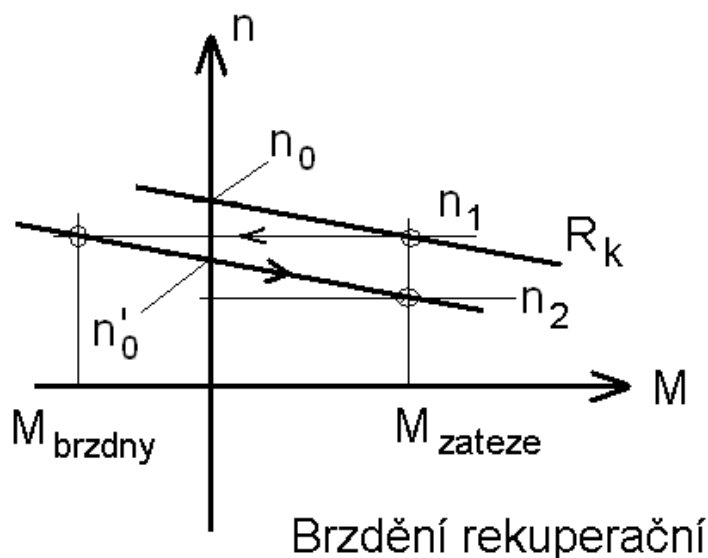
Obr.21. Model DC motoru zatížen po rozběhu



Obr. 22. Graf proudu a otáček procházející modelem po zatížení

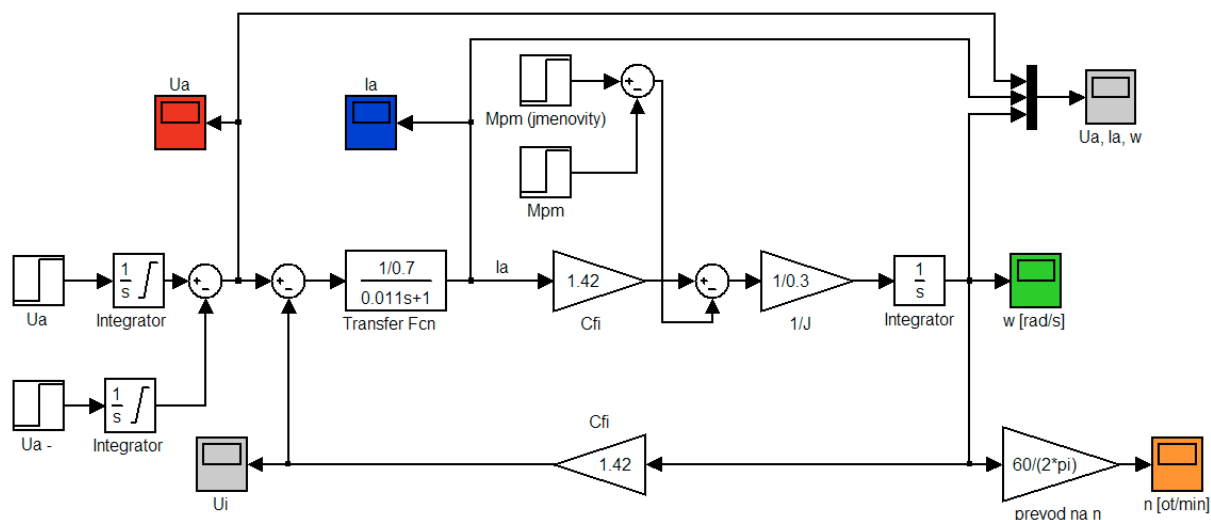
## 7. Brzdné stavy DC motoru s modely v simulinku

### 7.1 Generátorické brzdění

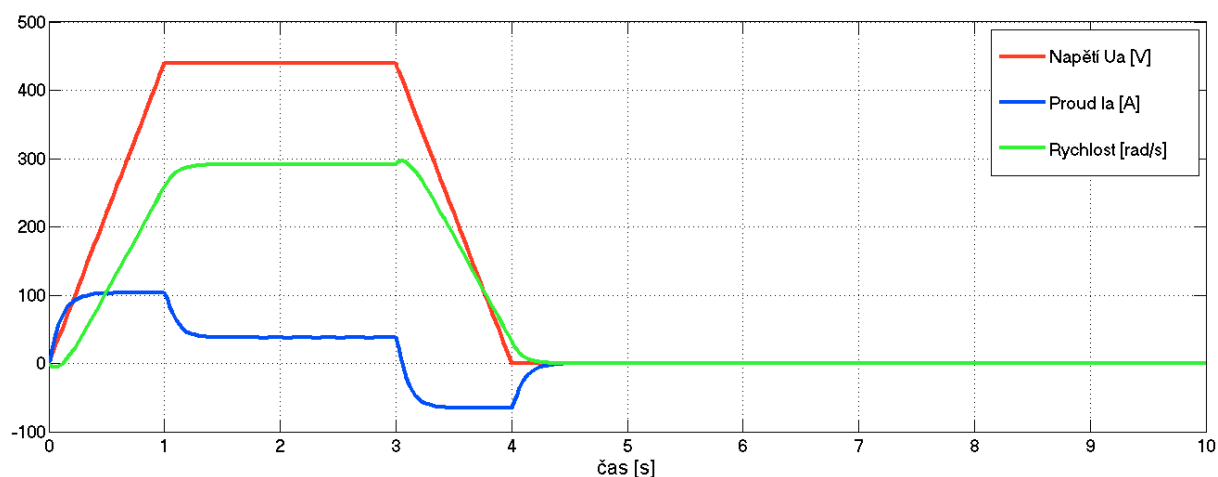


Obr.23. Brzdění generátorické (rekuperační)

Tento způsob brzdění nastává tehdy pokud jsou otáčky (rychlost) motoru větší než je hodnota otáček naprázdno tj.  $n > n_0$ , motor se stane generátorem a dodává el. energii zpět do sítě. Do rekuperačního brzdění je možno přejít snížením napětí (tj. přechodem na novou momentovou charakteristiku). Snížením napětí klesne rychlost motoru naprázdno. Ale vlivem setrvačnosti rotujících hmot se motor točí svou původní rychlostí, která je stále rychlejší než otáčky motoru na prázdko. [2]



Obr. 24. Model generátorického brzdění



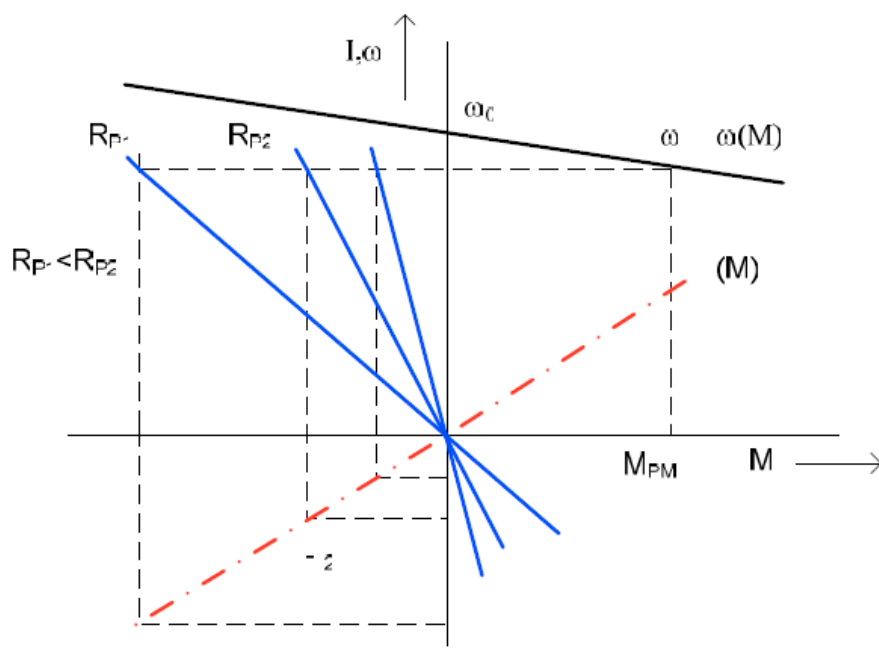
Obr. 25. Graf napětí, proudu a rychlosti generátorického brzdění

Model generátorického brzdění je sestaven základními bloky simulinku. Do modelu je přivedeno napětí  $U_a = 440V$  prostřednictvím bloku Step. Blok Integrátor má za úkol omezit napěťovou složku a napětí tak pozvolna vzroste na 440V. Po ustálení napětí se v čase 3s přes blok Sum odečte -440V. Viz graf na obr. 25.

Na proudovém průběhu je vidět, jak proud při rozběhu téměř trojnásobně vzroste. Po rozběhu se proud ustálí na svých jmenovitých hodnotách 37,5A. V čase 3s, kdy nastává brzdění, proud klesne do záporných hodnot a motor je v generátorickém režimu.

Další průběh co budeme pozorovat je rychlost, kde si v grafu můžeme všimnout rozběhnutí motoru na jmenovité otáčky a v čase 3s pozvolného brzdění, kde se nám vytvoří mírný překmit.

## 7.2 Brzdění do odporu



Obr.26. Brzdění do odporu DC motoru

Kotva motoru se při tomto brzdění odpojí od zdroje a připojí na vnější odpor  $R_p$ . Buzení zůstává konstantní. Napěťová rovnice má pak tvar:

$$0 = c\phi\omega + (R_a + R_p)I_a$$

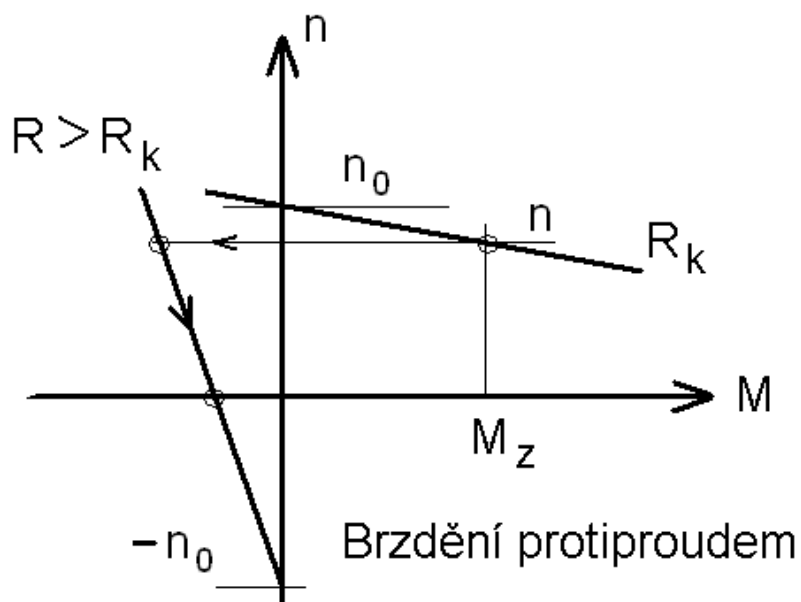
Takže brzdný moment

$$M = \frac{-(c\phi)^2 \omega}{R_a + R_p}$$

Ze statických charakteristik na obr. 26. je vidět závislost brzdného momentu na odporu. V průběhu brzdění klesá indukované napětí a brzdý moment. K udržení velikosti momentu je nutno vyřazovat odpor  $R_p$ . V oblasti malých rychlostí je hodnota brzdného momentu malá. Brzděná energie setrvačných hmot se mění neohospodárně v teplo. [3]



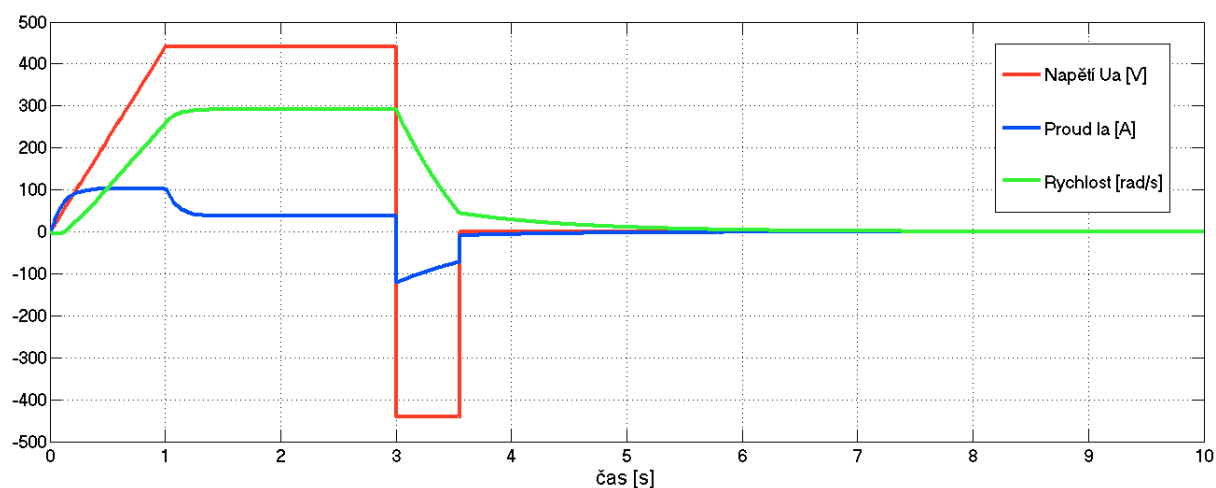
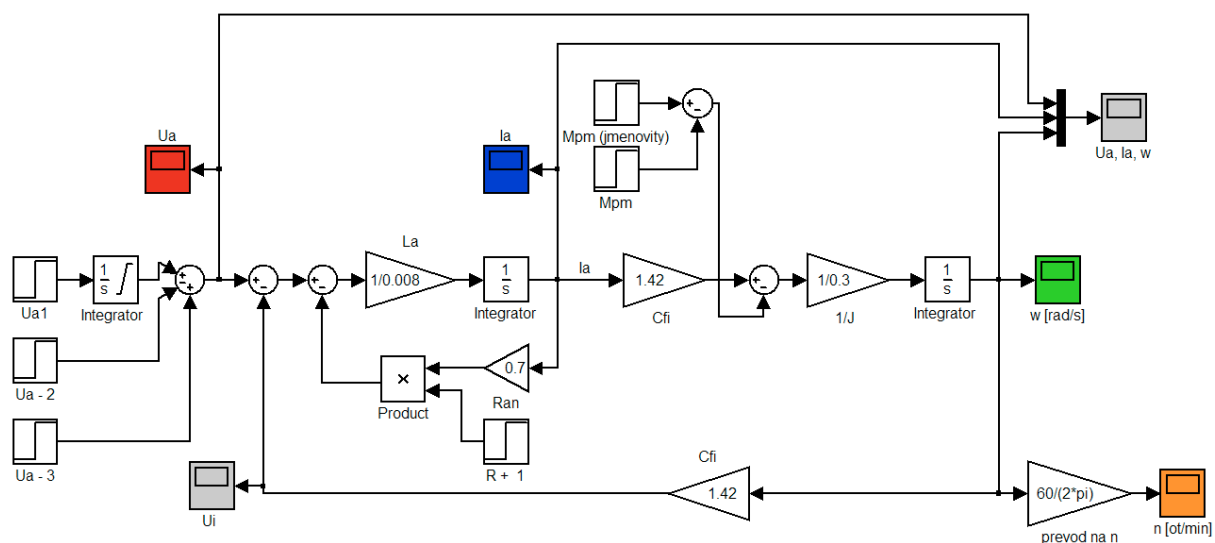
### 7.3 Brzdění protiproudem



Obr. 29. Brzdění protiproudem

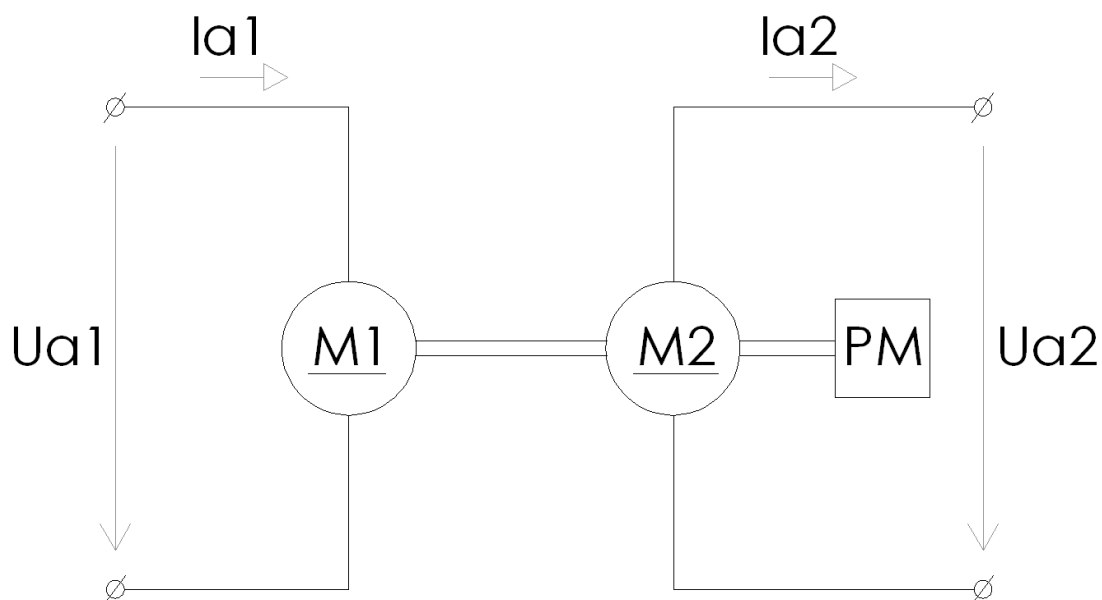
Brzdění protiproudem se realizuje změnou polaritu napájecího napětí kotvy a připojením odporu do obvodu kotvy. Aby po dosažení nulové rychlosti nezačala probíhat reverzace, musíme vypnout při dosažení nulové rychlosti napájení motoru. Rovnice pro momentovou charakteristiku brzdění je: [2], [3]

$$\omega = -\frac{U}{C\Phi} - \frac{R}{(C\Phi)^2} M$$

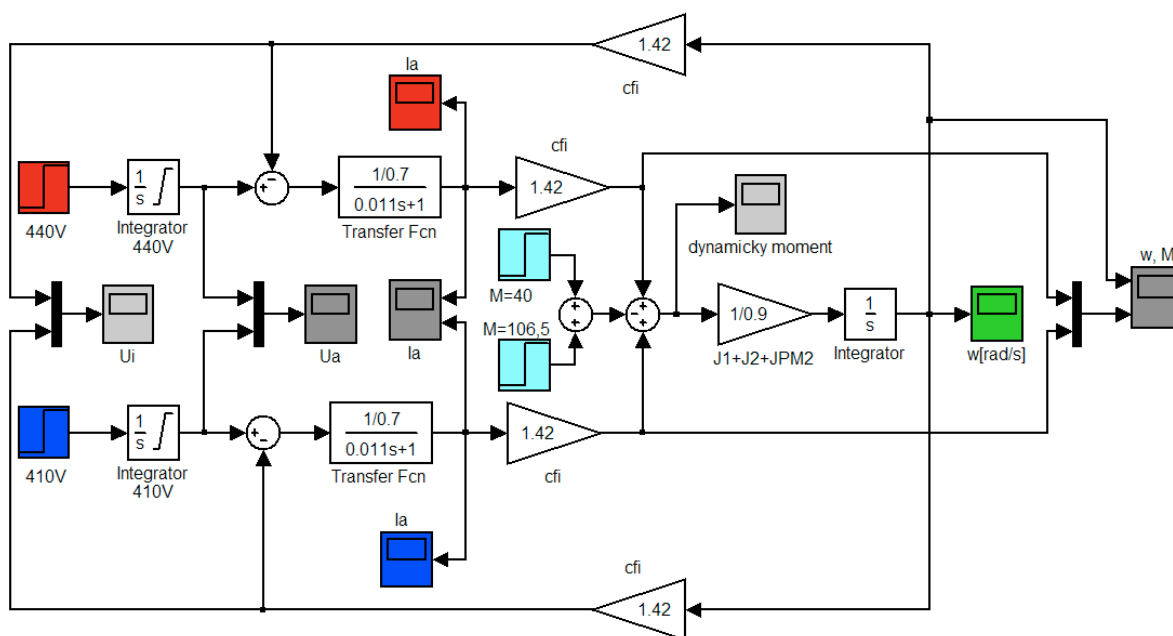


U brzdění protiproudem bylo přivedeno napětí  $U_a=440V$ , po 3s byla změněna polarita napětí na  $-440V$ , aby se motor dostal do protiproudého stavu. Při dosažení nulových otáček v čase 3,55s, bylo vypnuto napájení motoru. Graf napětí můžeme vypořizovat na obr. 31.

## 7.4 Model SS motorů spojených hřídelí

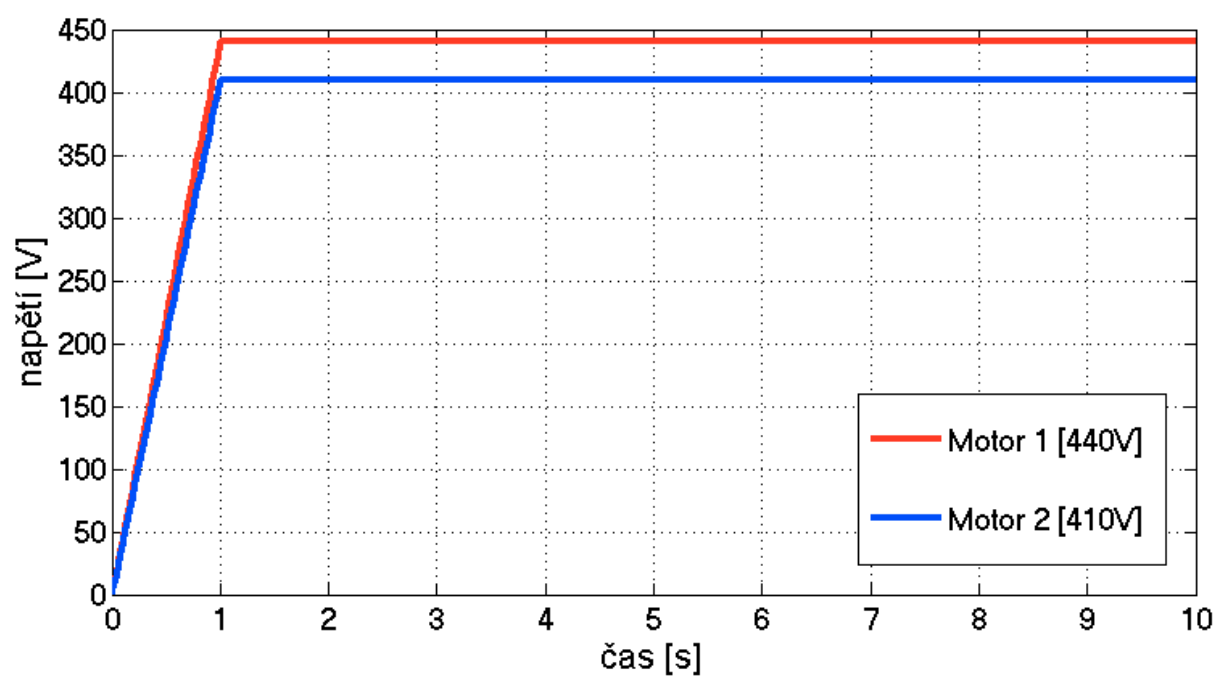


Obr. 32. Schéma tuhého spojení dvou motorů

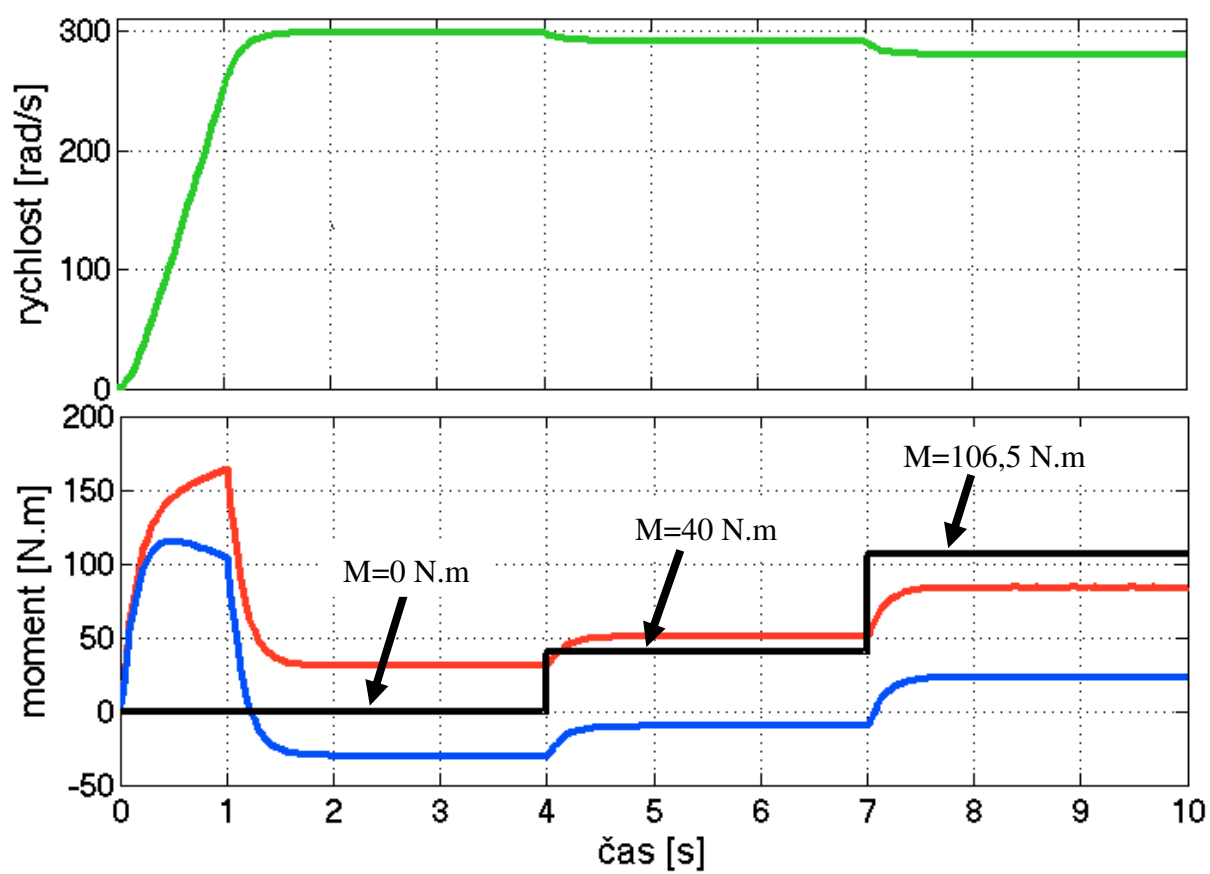


*Obr. 33. Model dvou motorů spojených hřídelí*

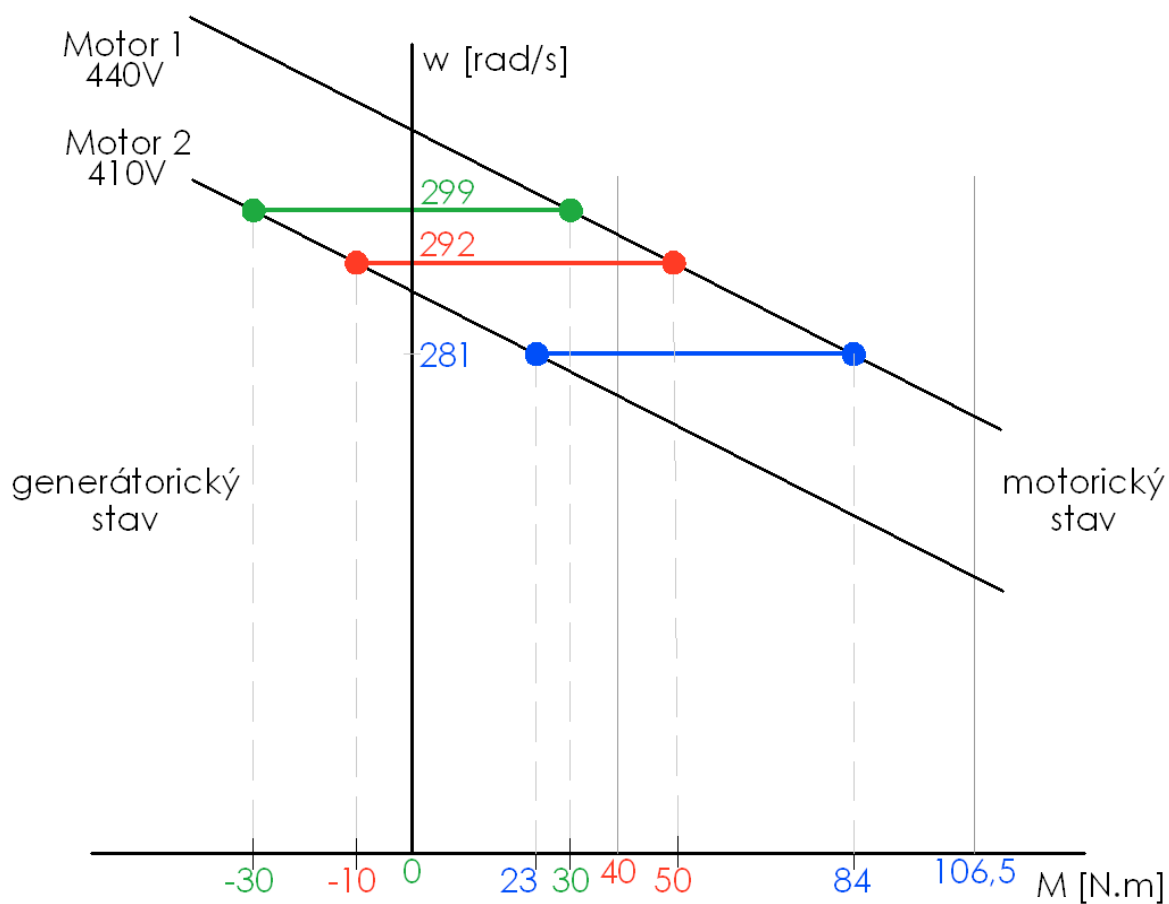




Obr. 34. Graf napětí



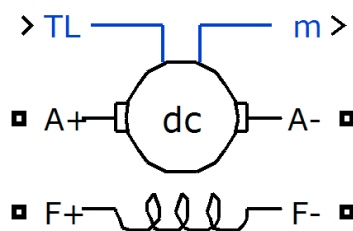
Obr. 35. Graf momentu a rychlosti motoru M1 a M2



Obr. 36. Mechanická charakteristika motoru M1 a M2

Na obrázku č. 33 jsou nasimulovány dva motory, které jsou poháněny jednou hřídelí. Na jeden z těchto motorů bylo přivedeno napětí 440V (dále jen M1) a na druhý 410V (dále jen M2) viz obr. 34. Momenty byly voleny tak, aby motory přecházeli ze stavu generátorického do motorického a tím se snižovali otáčky, což je znázorněno na obr. 35 a také na obr. 36, kde jsou stavy vykresleny. Jak můžeme vidět tak při 0 momentu je motor M2 v generátorickém stavu na hodnotě -30N.m a motor M1 na hodnotě +30N.m (motorický stav);  $M1+M2=0\text{N.m}$ . Při zvoleném momentu  $M=40\text{N.m}$  bylo dosaženo toho, že M1 je stále ještě v generátorickém stavu -10N.m a M2 v motorickém stavu 50N.m;  $M1+M2=40\text{N.m}$ . Poslední variantou tedy zůstala možnost, kdy jsou oba dva motory ve stavu motorickém. Tím se dosáhlo tak, že byl moment zvolen 106,5N.m;  $M1+M2=106,5\text{N.m}$ .

## 8. Knihovna Simulinku DC Motoru



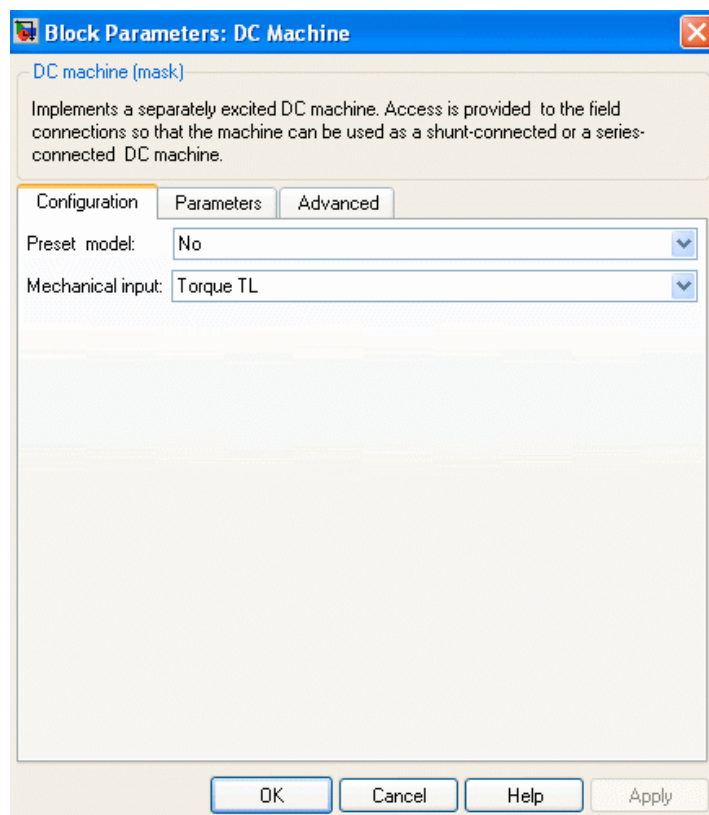
DC Machine

Obr. 37. Schématická značka bloku DC Machine

### DC Motor – Simulink

Vstup je v oblasti svorek (F+, F- ). DC stroj může být používán jako paralelně zapojený či sériově zapojený DC motor. Moment na hřídel vstupuje jako TL.

Rotor (A+, A- ) se skládá z induktoru  $L_a$  a rezistoru  $R_a$  v sérii se zpětným elektromotorickým napětím.



Obr. 38. Okno pro nastavení konfigurace DC Motoru

## **Přednastavený model**

Poskytuje sadu předurčených elektrických a mechanických parametrů pro stejnosměrný stroj: hodnocení síly (HP), stejnosměrné napětí (V), rychlost (1/min), a budicí napětí (V).

## **Preset model**

Poskytuje sadu předurčených elektrických a mechanických parametrů pro různé DC stroj, kde jsou přednastaveny různé typy motorů.

Výběrem jednoho z přednastavených motorů se automaticky načtou všechny elektrické a mechanické parametry vybraného motoru. Pokud však nechceme použít žádný z přednastavených motorů, zvolíme No a v záložce Parameters si zvolíme vlastní nastavení motoru.

## **Mechanical input**

Dovoluje vybrat buď kroutivou moment či rychlost rotoru.

Torque TL – momentový vstup [N.m]

Speed w - rychlostní vstup [rad/s]

Po vybrání momentu TL [N.m] se automaticky v bloku změní vstup na TL. Rychlost je určena setrvačností J a rozdílem mezi použitým TL a  $T_e$  (elektromagnetický moment). Znaménko u TL je následující: pokud jsou otáčky kladné, moment je kladný a je v motorickém stavu. Pokud jsou otáčky záporné, je v generátorickém stavu.

Po vybrání rychlosti w [rad/s] se automaticky u bloku změní vstup na w. Setrvačnost J je zanedbána. Použití rychlosti w jako vstupu do bloku umožňuje modelování mechanického spojení mezi dvěma stroji.

**Block Parameters: DC Machine**

DC machine (mask)

Implements a separately excited DC machine. Access is provided to the field connections so that the machine can be used as a shunt-connected or a series-connected DC machine.

Configuration Parameters Advanced

Armature resistance and inductance [Ra (ohms) La (H)]  
[0.4832 0.006763]

Field resistance and inductance [Rf (ohms) Lf (H)]  
[84.91 13.39]

Field-armature mutual inductance Laf (H) :  
0.7096

Total inertia J (kg.m<sup>2</sup>)  
0.2053

Viscous friction coefficient Bm (N.m.s)  
0.007032

Coulomb friction torque Tf (N.m)  
5.282

Initial speed (rad/s) :  
0

OK Cancel Help Apply

Obr. 39. Okno pro nastavení parametrů bloku DC Machine

#### Armature resistance and inductance [Ra, La]

Odpor kotvy Ra se udává v ohms [ $\Omega$ ].

Indukčnost La je v henries [H].

#### Field resistance and inductance [Rf, Lf]

Odpor budicího vinutí Rf se udává v ohms [ $\Omega$ ].

Indukčnost budicího vinutí Lf se udává v henries [H].

#### Field armature mutual inductance Laf

Napětí na indukčnosti motoru Laf se udává v henries [H].

#### Total inertia J

Celkový moment setrvačnosti motoru se udává v [kg.m<sup>2</sup>].

**Viscous friction coefficient  $B_m$** 

Celkový součinitel tření  $B_m$  se udává v [N.m.s].

**Coulomb friction torque  $T_f$** 

Celkový třecí moment DC motoru se udává v [N.m].

**Initial speed**

Určuje počáteční rychlost DC stroje v [rad/s], aby motor spustil simulaci s určitou počáteční rychlostí. Pro spuštění simulace v ustáleném stavu, musí být počáteční hodnota vstupního TL úměrná počáteční rychlosti.

**Vstupy a výstupy:**

**TL** - vstupní mechanický moment zátěže [N.m]

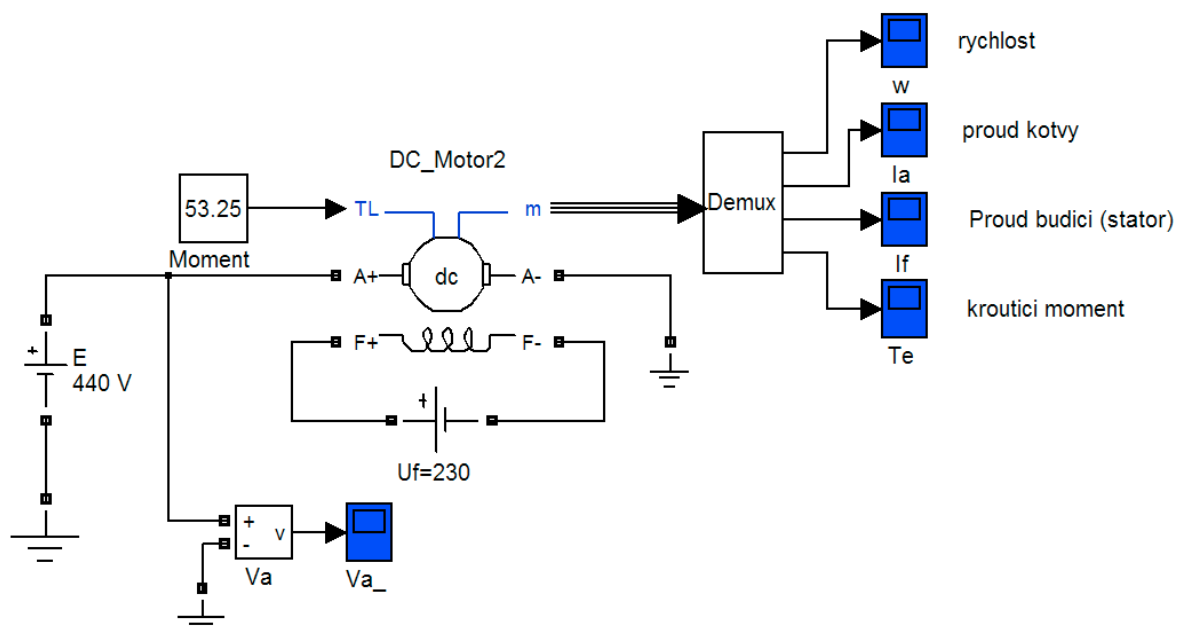
**w** – otáčky stroje [rad/s] (alternativní vstup do bloku závisí na hodnotě mech. vstupního parametru)

**m** – výstup z bloku, který obsahuje tyto čtyři signály:

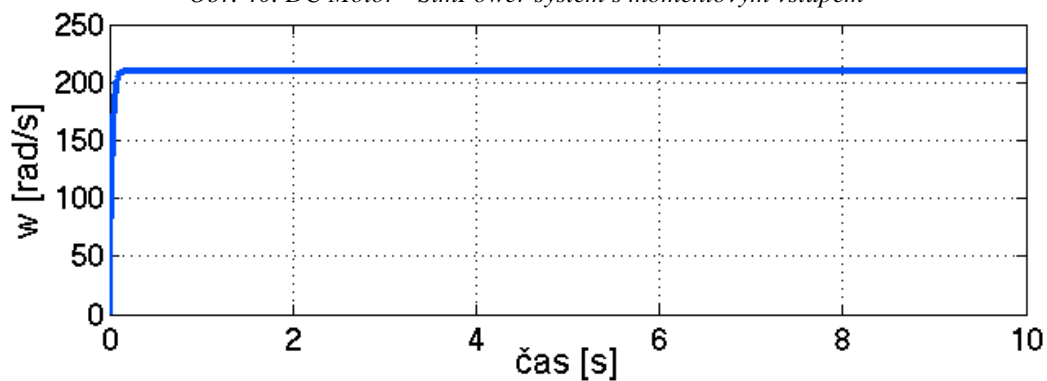
SIGNÁL	DEFINICE	JEDNOTKY
1	Rychlost	rad/s
2	Proud kotvy	A
3	Budící proud	A
4	Moment	N.m

## 9. Simulace DC Motoru - SimPowerSystems

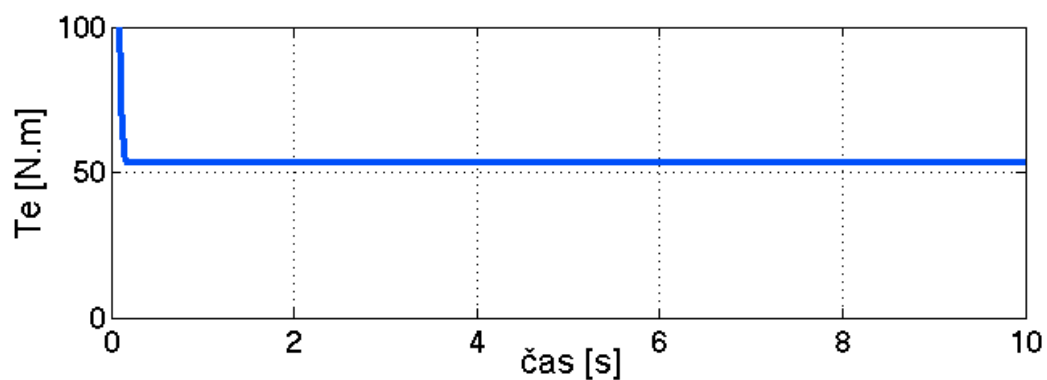
### 9.1 DC Motor s přivedením momentu



Obr. 40. DC Motor - SimPower systém s momentovým vstupem

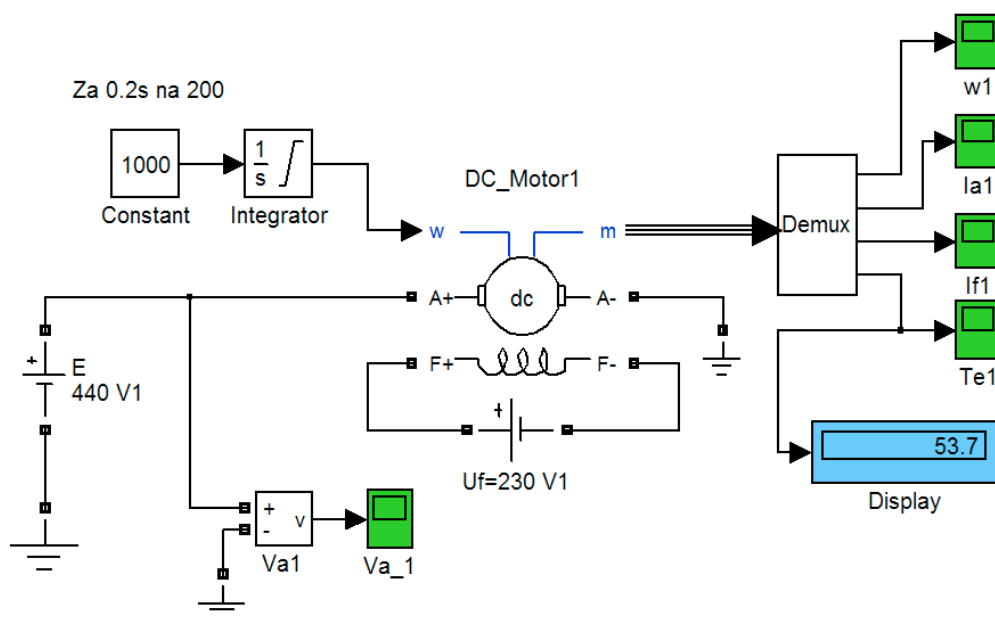


Obr. 41. Graf rychlosti

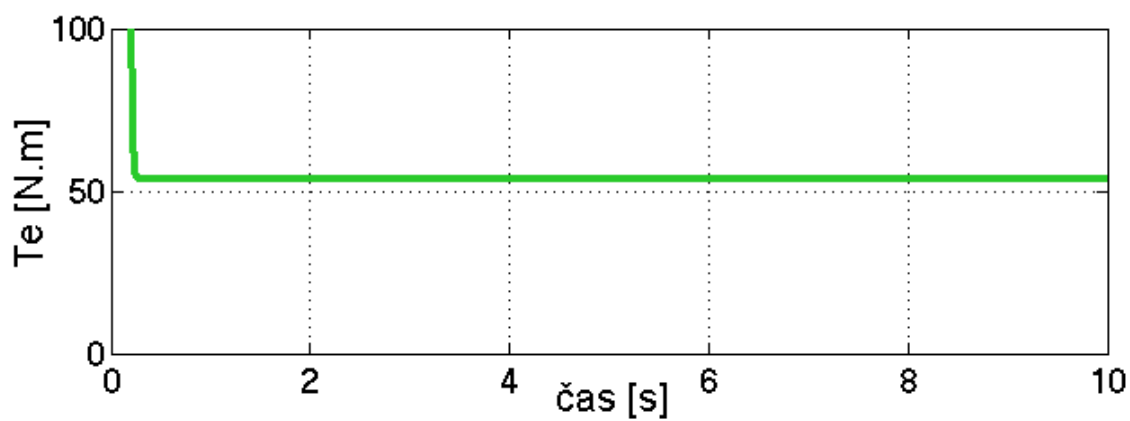


Obr. 42. Graf momentu

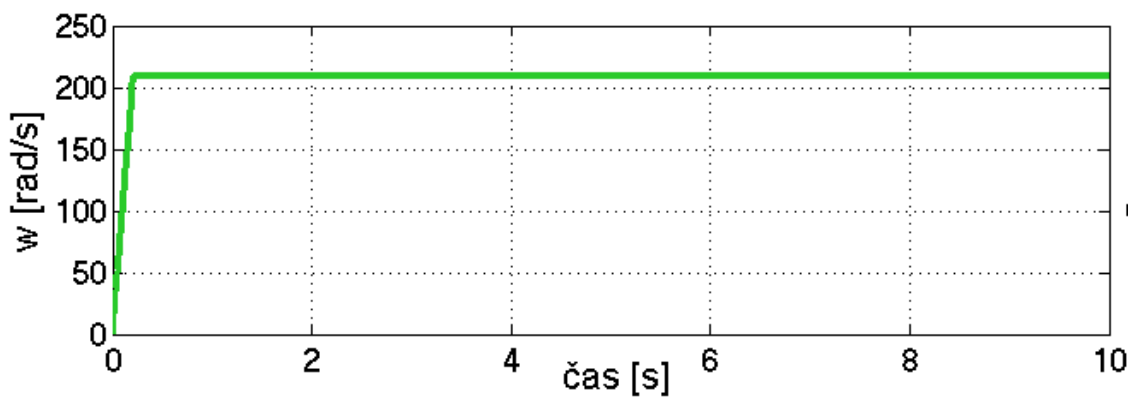
## 9.2 DC Motor s přivedením rychlosti



Obr. 43. DC Motor - SimPower systém s rychlostním vstupem



Obr. 44. Graf momentu



Obr. 45. Graf rychlosti



Simulace DC motoru s využitím speciálního bloku, který je obsažen v knihovně SimPowerSystems, je v programu Matlab&Simulink. Tento speciální blok umožňuje dvě možnosti vstupů. Do DC motoru může vstupovat moment nebo rychlost.

V kapitole 9.1. byl přiveden jako vstup jmenovitý moment ( $M=53,25 \text{ N.m}$ ) do speciálního bloku, který má své vnitřní parametry nastaveny dle motoru TTN 20Ab. Výstupní hodnota rychlosti je po ustálení  $209 \text{ rad/s}$ . Otáčky jsou nižší, než se očekávalo, kvůli budícímu napětí  $U_f$ , které bylo pevně zadáno. Pokud by se budící napětí snižovalo (odbuzovalo), otáčky motoru by se zvyšovaly.

V kapitole 9.2. vstupovala do bloku rychlost, která byla přivedena pomocí bloku Constant a omezena blokem integrátor na hodnotu  $209 \text{ rad/s}$ . V této simulaci byla snaha ověřit, zdali moment bude stejný jako moment jmenovitý. Toho se přibližně dosáhlo, což je vidět na obr. 44, kdy se moment  $T_e$  po ustálení rovnal přibližné hodnotě momentu jmenovitého.

## 10. Závěr

V této bakalářské práci bylo úkolem popsat a vytvořit matematický model DC motoru a simulovat brzdné stavy v programu Matlab&Simulink. V úvodu práce se zabývám teoretickým popsáním stejnosměrných strojů a jejich rozdělením, základními principy a konstrukčním provedením. V druhé části teoreticky popisuji matematický model DC motoru a jeho jednotlivé základní bloky v Simulinku, včetně jejich funkcí. Následně byl pomocí těchto základních bloků matematický model sestaven. S tímto modelem DC motoru jsem dále pracoval a simuloval brzdné stavy.

Zajímavá byla simulace dvou totožných stejnosměrných motorů navzájem spojených hřídelí. Na této simulaci se dalo demonstrovat chování obou motorů při změně momentu pracovního mechanismu. Při nízkém zatížení jsou otáčky vysoké a jeden z motorů je v generátorickém stavu a druhý ve stavu motorickém. Při větším zatížení se otáčky snižovaly a oba motory přecházely do stavu motorického.

Dalším úkolem bylo sestavit model stejnosměrného motoru pomocí speciálních bloků v Simulinku a porovnat simulace s modelem vytvořeným základními bloky. Ukázalo se, že model vytvořený speciálními bloky fungoval poněkud odlišně oproti základnímu modelu. Po přivedení stejných parametrů do obou modelů (modelu se speciálními bloky i do modelu se základními bloky) se model se speciálními bloky rozjel pouze na 67% rychlosti oproti modelu se základními bloky. To bylo způsobeno pevně nastaveným budícím napětím  $U_f$ , se kterým se v modelu se základními bloky neuvažuje.

Na závěr bych chtěl říci, že simulování se základními bloky bylo pro mne přínosnější, jelikož v matematickém aparátu mohu přesně nastavit všechny potřebné parametry. Speciální blok DC motoru má svou vnitřní strukturu pevně danou a tím uživateli omezuje možnosti nastavení.

## Použitá literatura

- [1] CAHA, Zdeněk. *Elektrické pohony*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990, 359 s. ISBN 80-030-0418-7.
- [2] SKALICKÝ, Jiří. *Elektrické regulované pohony*. VUT Brno, 2007.
- [3] NEBORÁK, Ivo. *Mechatronické systémy – DC motory*. VŠB-TU Ostrava.  
[http://homen.vsb.cz/~hav278/MS/Studijni\\_opory/Motory\\_DC.pdf](http://homen.vsb.cz/~hav278/MS/Studijni_opory/Motory_DC.pdf)
- [4] ROUBÍČEK, Ota. *Elektrické motory a pohony: příručka techniky, volby a užití vybraných druhů*.  
1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 191 s. ISBN 80-730-0092-X.
- [5] DUŠEK, František. *Matlab a Simulink: úvod do používání*. Vyd. 1. Pardubice:  
Univerzita Pardubice, 2005, 172 s. ISBN 80-719-4776-8.